

回転体構造のアンテナの電磁界解析手法とその応用に関する研究

著者	福澤 恵司
号	758
発行年	1979
URL	http://hdl.handle.net/10097/9494

氏 名	ふく 福 ざわ 澤 けい 恵 じ 司
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 55 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	回転体構造のアンテナの電磁界解析手法とその応用に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 佐藤利三郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 佐藤利三郎 東北大学教授 西田 茂穂 東北大学教授 安達 三郎 東北大学助教授 長沢 庸二

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

三次元導体による電磁界の放射・散乱に関する問題の中で，回転体構造は，volume type のアンテナや，飛翔体等による電磁波の回折・散乱あるいは電磁誘導等の諸特性を解析するモデルとして有用であり，多くの研究がなされてきている。しかし，球あるいは回転楕円体のごとく形状が座標系に一致し，しかも電磁波動を記述する固有関数系が得られる場合を除いて形式上の厳密解が得られないため，一般的な形状に対しては近似的手法に頼らざるを得ず，波長程度の大きさを持つ物体の場合には，表面における電磁界（導体の場合，等価な表面電流密度）を未知関数とする積分方程式に帰着して数値解法により解析されることが多い。ところが，通常用いられる導体表面における境界条件から導出される積分方程式では，表面上での二重積分を含み，しかも積分核が特異性（積分値は有限）を持つため数値解析が容易ではなく，更に，内部に共振モードが存在するような周波数において，解が唯一に決定されない欠点も有しているため，解析上の制約が大きい。これに対して，閉曲面を有する導体では，外部の電磁界に対して導体内部の補対領域で全電磁界が零となることから，導体表面上に代って内部で全電磁界が零とする“拡張された”境界条件がWaterman らによって導びかれた。この境界条件による積分方程式では，積分核が正則となり，また内部の共振モードに無関係に解が得られる特長を有している。しかし，内部における境界条件の十分性が不明確であったり，積分核が複雑な関数となるなど実用上の問題点

が残されていた。

本論文では、拡張された境界条件を適用して、任意形状の回転体導体への一般的な外部電磁界による励振・入射問題を定式化し、数値解析に便利な解析手法を与えること、その応用として回転体構造のアンテナおよび回転体導体への平面波入射問題を解析し、諸特性を明らかにすることを目的としている。

第2章 拡張された境界条件を用いた回転体導体による電磁界問題の定式化

本章では、拡張された境界条件を適用して、任意形状の回転体導体に対する一般的な外部からの電磁界励振・入射問題の定式化を行っている。

図1に示すような任意形状の回転体導体において、構造が回転対称であることを考慮すれば、内部の電磁界は、円筒座標系 (ρ, ϕ, z) のモード関数で表示可能な円筒領域の解を解析接続することによって得られ、これらは共通な回転軸 (z 軸) 上の電磁界の性質のみを用いて記述できることが示される。すなわち、内部の電磁界を零にする境界条件は、この性質を用いて各モード独立に記述できることが示され、その必要かつ十分な条件として電磁界各成分の関係から、2つの電磁界成分を用いて明確に与え

ている。更に、この境界条件から、導体面上の二次元的表面電流分布の各モード成分に関する積分方程式を、すべて一次元積分のみを含む簡潔な形式で導出している。この積分方程式は、積分核が閉じた形式の簡単な関数で表示されるため、数値解析に対してきわめて有用であり、しかも理論的には厳密な積分方程式である。

この結果、拡張された境界条件を用いて回転体導体による電磁界問題を定式化する場合の、従来残されていた問題点が解決され、一般的な電磁界に対して、Al-Badwaihy らによって与えられている回転軸上における境界条件は、不十分であること、また電磁界が回転方向 (ϕ) に依存しない回転体アンテナに対して従来より用いられている境界条件は、必要十分となることが明確にされている。

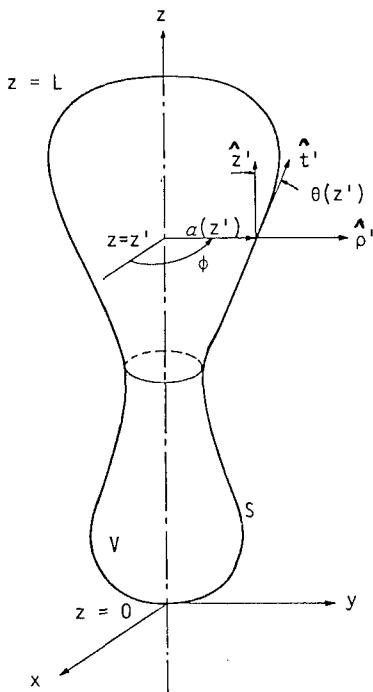


図1 回転体の座標系

第3章 電流分布を近似する展開関数についての解析

電流分布に関する積分方程式は、特殊な場合を除いて解析的に解くことが困難であり、数値解析等に頼らざるを得ない。数値解析では、電流分布を近似する関数は任意であるため、解を定性的に把握しにくい。そこで、ここでは積分方程式の数値解析において重要となる電流分布を近似する関数を選択する指針を得るために、三次元構造の具体例として、同軸線路より励振される有限長円筒状アンテナをとり上げ、電流分布をフーリエ級数表示して解の収束性、高次の展開係数の漸近的性質について検討している。その結果、フーリエ級数の高次の展開係数は、無限長円筒状アンテナの解析から得られている結果と同様な、給電部の構造に依存する項のほかに、有限長アンテナであるための端部の構造に依存する項の和、すなわち給電部および端部の電気的不連続性に依存してほぼ決定されることが示され、これがアンテナの入力アドミタンスあるいは電流分布の収束に比較的大きな影響を与えていることが定量的に明らかにされた。更に、このような電気的不連続性を近似する関数を用いて電流分布を表示し、数値解析した結果、収束の早い良好な解が得られ、特に電氣的に太い構造に対して有効であることが判明した。

これらの結果は、数値解析において電流分布を近似する展開関数を選択する上で、重要な基礎資料になると考えられる。

第4章 回転体構造のアンテナの解析

本章では、前章までに得られた結果を基にして、回転体構造のアンテナの解析を行い、種々の特性を明らかにしている。

二つの円錐状導体を接合した同軸線路より励振される重円錐モノポールアンテナは、アンテナ長 h に対する円錐形給電部の比 R/R_c がおよそ0.5以上であれば、同じアンテナ長の円錐形モノポールアンテナと同様に、 $h \geq 0.25\lambda$ (λ :波長)において、体積および表面積が小さいにもかかわらず、良好な広帯域入力特性が得られることが知られている。ところが R/R_c を0.5以下にすると、上下円錐の接合部における電流波の反射に起因すると考えられる高次の共振が顕著になり、広帯域特性が損われる。そこで、本論では、 $R/R_c = 0.2$ の構造について、上下円錐を球面および円弧の回転面によって仲介し滑らかに接合した二つの変形した重円錐モノポールアンテナをとりあげ、接合部の影響を検討するとともに、特性を解析している。その結果、曲率の小さい滑らかな回転面で接続することにより、表面積がさらに小さい構造であるにもかかわらず、円錐形給電部が 0.25λ 以下からでも広帯域入力特性を持たせ得ることが明らかになった。また、アンテナの入力アドミタンスに関する実験を行い、理論解析の妥当性を示している。この結果を基に、円錐形給電部の上部に導体球を滑らかに付加したモノポールアンテナを解析し、更に良好な広帯域特性が得られることを示している。

本章ではまた、第2章で得られた積分方程式を若干変形することにより、近似することなしにFlat-endを持つ充実円筒状アンテナの解析に適用できることを示し、電氣的に比較的大い構造についての数値解析により、中空円筒状アンテナの電流分布との相違点を明らかにするとともに

に、Holly による実験値との比較を行って良好な一致を得ている。更に、積分方程式を拡張して、表面インピーダンスを持つ回転体アンテナにも適用可能であることを示し、解析例からその有効性を確認している。

第 5 章 回転体導体への平面波入射による誘導表面電流と散乱特性の解析

飛翔体等の三次元構造の物体による電磁波の散乱あるいは電磁誘導を解明することは、工学的に重要な問題であるが、従来、波長程度のオーダーの大きさを持つ構造に対して、特殊な場合を除いて比較的簡単な形状についても解析が容易ではなかった。本章では、第 2 章において導いた積分方程式を用いて、種々の回転体導体をモデルにとり上げ、平面波が入射した場合の諸特性を解析している。

まず、一般的な形式で厳密解が得られる唯一の形状である球導体の場合の表面電流分布および散乱断面積の数値計算を行い厳密解と比較して、本論で導いた積分方程式を用いた数値解析が有効であることを確認している。また、球形共振器の内部共振周波数に一致する場合の表面電流は、内部共振に無関係に安定した解が得られることを示した。これらの結果を基に、回転楕円体、まゆ形導体、円錐球導体等の表面電流分布を解析し、長短軸比の大きい細長い回転楕円体へ回転軸方向から入射した場合の表面電流は、拡張された物理光学近似による電流と良く一致すること、回転体の半径が大きくなると入射波の影になる領域において減衰する定在波となることを明らかにしている。また、回転軸に対して垂直及び斜入射による回転楕円体およびまゆ形導体上の表面電流を、TM 波および TE 波それぞれの場合について求め、入射角に依存して変化する分布の様子を明らかにしている。得られた電流分布を用いて散乱電磁界を求めることができ、回転楕円体およびまゆ形導体について種々の入射角に対しての散乱特性を示した。更に、回転体の物理的形状に依存する本論で用いた数値解法の適用範囲についても明らかにしている。

第 6 章 結 論

本論文の各章で得られた結果をとりまとめ、今後の問題点を述べた。

論文審査の要旨

三次元導体による電磁界の放射・散乱に関する問題の中で、回転体構造は、構造物、飛行物体等による電磁波の諸特性を解析するモデルとして有用であり、多くの研究が行われている。しかし、電磁波動を厳密に記述する固有関数が得られる物体の形状は限られているため、一般の三次元導体に対する電磁界の問題解決は、近似手法に頼らざるを得ない。著者は、三次元導体を回転体導体に限定し、拡張された境界条件を適用して、電磁界の諸特性を一般的な形式で定式化し、数値解析に有利な解析手法を開発した。本論文はそれらの成果をまとめたもので、全文6章より成る。

第1章は緒論である。第2章では、回転体構造を有する導体に対し、導体内部領域での電磁界の解析的性質を利用して、内部の電磁界に対する境界条件を、回転軸上における電磁界の性質のみで記述できるという、拡張された境界条件の必要十分性を明らかにし、これを用いて、電流分布に関する積分方程式を導いている。

第3章では、導体上の電流分布に関する積分方程式を、数値解析により解く手法について詳述している。数値解析を行う場合、電流分布を近似する展開関数の選択が重要な要素となる。著者は、電流分布をフーリエ級数で表示し、一つの限定したアンテナについて詳細に解析し、解の収束性及び高次展開係数の漸近的性質に検討を加え、その特徴を明らかにしている。

第4章では、前章までの結果を利用し、回転体構造のアンテナの解析を行い、種々の特性を明らかにした。円錐形給電部を有するアンテナではアンテナ表面を滑らかに接続すること、または球を付加することで、それぞれ良好な広帯域特性を有することなどを明らかにしている。

第5章では、回転体導体に平面波が入射した場合の、導体表面の電流分布及び散乱特性等について述べている。回転体導体としては、回転楕円体導体、まゆ形導体及び円錐・球導体などである。また、回転軸に対して垂直及び斜入射する平面波によって、導体に誘起する電流分布及び散乱特性を、TM波及びTE波のそれぞれの場合について求めている。さらに、導体の物理的形状とここで用いた数値解析手法の適用限界の関係を明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は拡張された境界条件により、任意形状の回転体導体に対する電流分布の表示を積分方程式によって記述し、数値解析により放射及び散乱特性に対する解析手法を明確にしたもので、アンテナ工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。